

Рис. 3. Зависимость оптической силы ТЛ от мощности накачки: а – $//N_m$, б – $//N_g$

лении, параллельном плоскости поляризации излучения лазера ($//N_m$). Абсолютные значения оптической силы данной линзы в обоих направлениях растут с увеличением средней мощности накачки. Коэффициент чувствительности $M_{A,B}$ активного элемента из Nd^{3+} :КГВ, равен $M_A=177$ дптр/Вт для направления $//N_m$ и $M=-161$ дптр/Вт для направления $//N_g$. Величины $(dn/dT+C_A)=2.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $(dn/dT+C_B)=-2.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (измеренные методом анализа пространственных характеристик лазера) и $(dn/dT+C_A)=2.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (по методу срыва генерации).

двух направлениях. Для определения коэффициента чувствительности резонатора к ТЛ данные аппроксимировались линейной зависимостью (а, б). Далее, при помощи выражения (1) рассчитывались сумма параметров $(dn/dT+C_{A,B})$ и коэффициент чувствительности $M_{A,B}$ лазерного кристалла Nd^{3+} :КГВ

Наведенная в кристалле Nd^{3+} :КГВ термическая линза является бифокальной с отрицательной оптической силой в направлении, перпендикулярном плоскости поляризации излучения лазера ($//N_g$), и с положительной оптической силой в направ-

Литература

1. Biswal S., O'Connor S. P., Bowman S. R. Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate // Appl. Opt. Vol. 44. 2005. №15. P. 3093–3097.
2. Filippov V. V., Kuleshov N. V., Bodnar I. T. Negative thermo-optical coefficients and athermal directions in monoclinic $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ and $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ laser host crystals in the visible region // Appl. Phys. B. Vol. 87. 2007. P. 611–614.
3. Hodgson N., Weber H. Optical resonators. New York, 1997.

ОСОБЕННОСТИ ПРОБОЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

П. Н. Малевич, С. Я. Килин

В настоящее время ведутся активные исследования взаимодействия мощных лазерных импульсов с прозрачными твердыми телами. Интерес обусловлен возможными практическими применениями технологии: раз-

ка прозрачных материалов, а также повышение мощности лазерных систем. Целью данной работы явилось: исследование характеристик разрушения оптических стекол в зависимости от параметров и схем воздействия лазерного излучения, а также разработка основ технологии объемной лазерной резки оптических материалов.

Оптический пробой является сильно нелинейным эффектом, поэтому следует предъявлять повышенные требования к стабильности энергетических и временных характеристик лазерной генерации, а также весьма желательно использовать одномодовый лазер [1]. Критичным фактором является также однородность стекла: в [2] показано, что даже за счет незначительных неоднородностей показателя преломления областей микронного размера может возникать большое локальное усиление интенсивности излучения, что создает условия для инициирования оптического пробоя. Ведутся и теоретические исследования, например, в [3] делается вывод, что вне зависимости от времени воздействия лазерного импульса и характера поглощения энергии в прозрачном диэлектрике основной причиной образования трещины является стрикционный механизм.

Наши эксперименты проводились с моноимпульсным лазером на $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ и его гармониках. Благодаря большой длине резонатора, а также использованию внутрирезонаторного телескопа с увеличением 2^x удалось получить мощную генерацию на TEM_{00} моде (до 95 мДж/имп). Также для дальнейшего уменьшения расходимости в ряде экспериментов использовался внerezонаторный телескоп с увеличением 3^x .

В экспериментах с первой и второй гармониках удалось получить повреждения только на нижней поверхности и в объеме образца, разрушения верхней поверхности отсутствовали, причем наблюдалось некоторое влияние качества обработки (шлифованная, полированная) и ориентации этой поверхности на форму и размеры повреждений образца. Стандартно наблюдаемое повреждение поверхности имеет структуру: центральная точка с отходящей вглубь материала (навстречу падающему пучку) тонкой нитью и сколами материала в виде «крыльев» в поперечном направлении. Разрушения в объеме аналогичным образом имеют форму нитей с нанизанными на них «паучками» трещин (*рис. 1*).

Были выполнены эксперименты по изучению взаимосвязи размеров пробоя на поверхности и в объеме материала в зависимости от жесткости фокусировки (фокусное расстояние линзы и расходимость пучка) и длины волны лазерного излучения для нескольких типов оптических стекол. Из экспериментов, как с низкокачественным (оконным) стеклом, так и с оптическим стеклом К8 видно, что поперечный размер зоны разрушения слабо зависит от фокусного расстояния линзы и существенно больше,



Рис. 1. Микрофотография типичного разрушения в объеме оптического стекла в экспериментах вне резонатора (вторая гармоника $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ лазера, стекло К8)

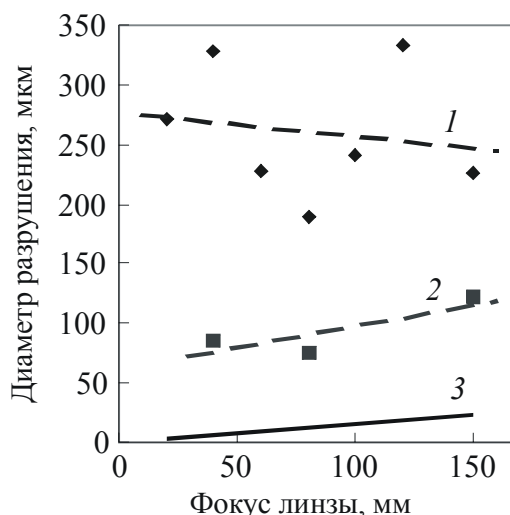


Рис. 2. Экспериментальные значения диаметра разрушения, производимые второй гармоникой в различных видах стекол
 1 – Стекло типа «оконного», эксперимент
 2 – Стекло К8, эксперимент
 3 – Расчетные размеры перетяжки

чем диаметр зоны перетяжки пучка. Также практически не приводит к уменьшению размеров пробоя и уменьшение расходимости пучка, хотя стабильность процесса при этом возрастала. В экспериментах с основной гармоникой при переходе к качественному стеклу К8 наблюдался рост пороговой энергии пробоя, но, возрос также и диаметр производимых разрушений (с 250 мкм до 1 мм). С уменьшением длины волны картина менялась, и для второй гармоники, наблюдаемые разрушения в качественном стекле (порядка 150 мкм) были меньше чем в оконном (рис. 2). Применение третьей гармоники (355 нм) приводило к дальнейшему уменьшению размеров области пробоя (до 60 мкм), при этом размеры разрушения становятся сравнимы с размерами перетяжки, а порог пробоя сместился в область значительно более низких абсолютных значений энергии. Из сравнения параметров пробоя в стекле типа «оконного» и качественного стекла К8, можно предположить, что механизмы развития повреждения в них несколько различны. В оконном стекле затравочное повреждение образуется на неоднородностях и поглощающих включениях. В качественном же стекле намного меньшее количество дефектов и практически отсутствуют поглощающие включения. Поэтому начальное повреждение, вероятно, образуется за счет многофотонного поглощения. В таком случае, для гармоник требуется меньшая интенсивность для получения пробоя, и, как следствие, меньшая энергия вкачивается в образовавшийся дефект, что приводит к снижению размеров разрушения.



Рис. 3. Микрофотография нитей самофокусировки в объеме стеклянного образца
(Справа видно разрушение аналогичное «обычному» пробую)



Рис. 4. Микрофотография поверхности разреза в экспериментах по резке стекла К8 излучением второй гармоники $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ лазера

Аналогичные выводы были сделаны в других исследованиях: в стеклах и плавном кварце в случае длин волн короче ~ 355 нм резкое падение порога разрушения авторы связывали с двухфотонным поглощением [4, с. 686].

Также нами была рассмотрена схема для реализации пробоя внутри резонатора. Телескоп, находящийся внутри резонатора, заменялся на телескоп Кеплера с увеличением -1^{\times} , вблизи области фокальной перетяжки, которого перемещался исследуемый образец стекла.

При соответствующем подборе элементов резонатора был реализован оптический пробой ряда материалов. Разрушение удавалось получать лишь на поверхности образцов, причем повреждение было похоже больше на проплавление поверхности поглощающего образца в режиме свободной генерации лазера (стекло НС-12, первая гармоника).

Также, в отдельных экспериментах были получены разрушения стекла в виде тонких (диаметром в несколько мкм) длинных нитей самофокусировки, проходящих через всю толщу образца (*рис. 3*). Однако надежно выделить условия получения указанного режима и обеспечить высокую повторяемость процесса нам пока не удалось, и требуются дополнительные исследования.

Нити самофокусировки с применением лазерных импульсов меньшей длительности были получены в работах [1,5].

Для отдельных видов оптических стекол удалось реализовать лазерный пробой с хорошей повторяемостью, что можно использовать практически, для резки соответствующих материалов (рис. 4).

Были получены следующие результаты:

1. Рассмотрена связь характеристик разрушений стекла с параметрами импульсов излучения лазера на $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$. Показано, что в зависимости от условий эксперимента реализуются различные механизмы разрушения, а именно:

- тепловое проплавление поверхности стекла при внутрирезонаторной фокусировке излучения;
- стрикционное разрушение поверхности и в объеме стекла;
- самоканализационные нити, проходящие через весь образец.

2. Показано, что в условиях стрикционного механизма пробоя определяющим размер разрушения фактором является длина волны лазерного излучения при практической независимости от расходимости и эффективности фокусировки пучка.

Литература

1. Шен И. Р. Принципы нелинейной оптики/ М. 1989 (Наука). С. 290–317, 494–506.
2. Груздев В. Е., Либенсон М. Н. О некоторых электродинамических аспектах воздействия мощного лазерного излучения на прозрачные среды // Известия Академии Наук. Серия физическая. 2001. Том 65 №4. С. 571–574.
3. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Механическое разрушение прозрачных твердых тел лазерными импульсами разной длительности// Квантовая электроника. 2002. 32. №4. С. 335–340.
4. Walter Koehner Solid state laser engineering Springer 2007. С. 680–701.
5. Стригин М. Б., Чудинов А. Н. Лазерная обработка стекла пикосекундными импульсами// Квантовая электроника. 1994. 21. №8. С. 787–790.

СОЗДАНИЕ ПЕРЕПУТАННЫХ СОСТОЯНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕД С МАЛОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ ДЛЯ УСТОЙЧИВОЙ ПЕРЕДАЧИ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ ПО ОПТОВОЛОКОННЫМ КАНАЛАМ

А. Б. Михалычев, С. Я. Килин

Перепутанные состояния играют важную роль при решении многочисленных задач квантовой информатики, таких, как квантовая криптография, создание квантовых компьютеров, передача квантовых состояний на большие расстояния. Проблемы создания перепутанных состояний и их распределения между различными наблюдателями представляют собой важную задачу квантовой информатики и активно изучаются в